

Рис. 3. Переходные характеристики по угловому перемещению привода без обратной связи по току при изменении  $J_{пр}$  в пределах  $(0,4...1,2) J_{расч}$

Аналогично выполнен расчет коэффициентов обратной связи для обеспечения  $K_3=0$  по формулам (16), (17). При данной настройке привода влияние изменения момента инерции на переходные характеристики примерно такое же, как и при отсутствии обратной связи по скорости (рис. 3). Перерегулирование появляется только при увеличении момента инерции относительно расчетного значения на 10% и более. Абсолютное значение полюсов для указанного двигателя по (15) несколько больше, чем по (12), что обеспечивает несколько меньшее время регулирования. Однако в обоих случаях оно не превышает 1 с (рис. 2, 3), что согласуется с расчетным значением по (11). Подобные результаты получаются и для других двигателей данной серии.

Таким образом, результаты исследования подтверждают возможность построения приводов для робототехнических устройств на основе двигателей постоянного тока без обратной связи по скорости или току двигателя при синтезе методом размещения полюсов. Следует отметить, что ограничение уровня сигнала на выходе устройства сравнения (переход в нелинейный режим) не отражается существенно на характере переходного процесса (незначительно возрастает время регулирования). Поэтому ограничение уровня задающего сигнала на входе не является обязательным для данных приводов.

**Заключение.** Результаты исследования подтверждают возможность построения приводов постоянного тока без обратной связи по скорости или току двигателя, и тем самым, минимизации структуры привода, при синтезе методом размещения полюсов. Обеспечиваемые при этом показатели качества переходного процесса позволяют применять данные приводы в составе роботов. Полученные аналитические зависимости дают возможность предварительно оценить длительность переходных процессов и рассчитать коэффициенты передачи в цепях обратной связи, не прибегая к стандартной процедуре синтеза.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Накано, Э. Введение в робототехнику / Э. Накано; пер. с япон. – М.: Мир, 1988. – 334 с.
2. Шахинпур, М. Курс робототехники / М. Шахинпур; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 527 с.
3. Филипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филипс, Р. Харбор; пер. с англ. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 616 с.
4. Копылов, И.П. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / И.П. Копылов, Б.К. Клоков. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. – 456 с.

Материал поступил в редакцию 25.11.15

#### PROKOPENYA O.N., VLASOVETS A.A., OLYOH A.G. Specificity of synthesis of robots drives by a method of poles arrangement

Possibility of creation of drives on the basis of direct-current motors without feedback on separate state variables at synthesis by a method of poles arrangement is well-founded. Conditions, a feedback on speed or a motor current can be unused, are formulated in the form of analytical dependences. Formulas for calculation of gains in circuits of the feedback are obtained, and it allows, the synthesis procedure can be simplified.

By numerical simulation it is confirmed that required quality of control are ensured in broad range of change of a moment of inertia of the drive. It allows such drives be applied for robots.

УДК 621.89

Акулич Я.А., Акулич А.П.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАР ТРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРИРАБОТКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**Введение.** Приработка во многом определяет общую долговечность деталей. К концу процесса приработки основные взаимосвязанные параметры качества поверхности, например такие, как шероховатость, микротвердость, структура граничного слоя металла и ряд других, приобретают значения, соответствующие данным условиям изнашивания или эксплуатации. Эти условия определяются материалом пар трения, скоростью скольжения, нагрузкой, способом смазывания, а также некоторыми другими факторами.

Крагельский И.В. одним из основных условий завершения процесса приработки считает переход исходной технологической шероховатости к эксплуатационной [1]. Экспериментальные исследования, приведенные в работах [2, 3], показали, что по окончании приработки на поверхностях трения формируется шероховатость, кото-

рая не зависит от исходной, полученной при механической обработке, а будет зависеть только от условий изнашивания. Данная шероховатость будет являться оптимальной для данных условий трения и обеспечивать оптимальный износ пары трения.

**Подготовка экспериментального исследования взаимодействия пар трения в процессе приработки.** По мнению Д.Н. Гаркунова [4], наиболее оптимальным вариантом является такая компоновка пары трения, когда сравнительно мягкая поверхность одной из деталей трения с меньшей площадью трения скользит по более твердой поверхности другой детали. При этом, коэффициент трения скольжения чувствителен к материалам пар трения, скоростям скольжения, давлению, видам смазки, качеству обработки трущихся поверхностей.

Акулич Антон Павлович, к.т.н. доцент, доцент кафедры технологии машиностроения Брестского государственного технического университета.

Акулич Ярослав Антонович, м.т.н., зам. декана факультета заочного обучения учреждения образования Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Установлено, что развитие процесса поверхностного разрушения связано с характеристиками шероховатостей поверхности, от которой зависят также несущая способность смазочных слоев, формирование сил трения и других эксплуатационных свойств контакта.

Таким образом, выбор материала представляет собой ответственную задачу, которая зависит от конструкции и назначения узла, условий эксплуатации, прочности деталей, надежности, затрат на изготовление и эксплуатационных расходов.

Для испытаний была определена пара трения типа “вал-втулка”. Образец, выступающий в качестве “вала” пары трения, был изготовлен из легированной конструкционной стали 40X с последующей термообработкой до HRC 40...45, ГОСТ 4543-71, а втулка – из оловянистой бронзы БрОЦС 5-5-5 ГОСТ 613-79. Известно, что сочетание материалов антифрикционных пар трения сталь-бронза относится к наиболее благоприятным, так как коэффициенты трения скольжения для них не будут иметь высоких значений.

Размеры образцов, подвергнутых испытаниям на трение, соответствовали руководству по эксплуатации машины трения 2070 СМТ–1 [5]. Радиус рабочей поверхности образцов составлял  $R_{раб} = 17,5$  мм.

Для начальных серий экспериментальных исследований, целью которых было определить зависимости коэффициента трения от скорости скольжения и нагрузки и таким образом подобрать оптимальные режимы при исследовании, были подготовлены образцы, окончательным методом обработки поверхностей трения которых являлось чистовое точение, параметр шероховатости поверхностей трения был задан  $R_a = 1,25$ .

Для последующих экспериментальных исследований, учитывая необходимость определения трибологических характеристик пар трения в процессе приработки, имеющих отличную исходную шероховатость, полученную разными методами механической обработки, сопрягаемые поверхности групп образцов имели фактический усредненный параметр шероховатости поверхностей, полученных шлифованием  $R_a = 0,27$  и точением  $R_a = 1,31$ . Оптимальные значения шероховатости для исследования пар трения данного типа были подобраны в соответствии с рекомендациями в источниках [6].

При проведении всех серий трибологических испытаний реализовывалась прямая пара трения, т.е. соблюдались следующие условия: вращался образец с большей номинальной площадью и большей твердостью исходной структуры материала поверхности, нагрузка прикладывалась через неподвижный образец.

Машина трения была снабжена камерой для испытаний пар трения в жидкой среде, в качестве которой было использовано масло И-40А, ГОСТ 20799-88, с кинематической вязкостью при 40°C 51–75 мм<sup>2</sup>/с. При испытании был реализован режим граничного трения.

В процессе трибологических испытаний регистрировались: момент трения  $M_{тр}$ , частота вращения образца, температура смазочной среды. Контроль температуры смазочной среды осуществляется при помощи погружной термопары “хромель-алюмель”. Несмотря на то, что измерение температуры смазочного материала в процессе испытания не позволяет количественно оценить температуру в зоне трения, однако, отслеживая динамику ее изменения, можно установить момент стабилизации температуры, что является одним из критериев завершения приработки.

Испытания пар трения “вал-втулка” проводились в несколько этапов. Основным показателем, по которому анализируют поведение пары трения, является коэффициент трения при определенном сочетании скорости и нагрузки. На первом этапе были проведены исследования по определению влияния скорости скольжения на коэффициент трения при ступенчатом нагружении. Испытания проводились при нагрузках 600 и 1000 Н. Для изучения влияния нагрузки на коэффициент трения испытания были проведены для скоростей скольжения 0,6; 0,8 и 1,0 м/с, с изменяемой нагрузкой на узел трения в диапазоне от 500 до 2600 Н.

При дальнейших исследованиях были определены трибологические характеристики пар трения, в процессе приработки имеющих различную исходную шероховатость, полученную разными методами механической обработки. Параметр шероховатости в процессе

эксперимента определялся с помощью профилографа-профилометра модели 296.

В заключительной части эксперимента были проведены лабораторные испытания пары трения “вал-втулка” на износ. Определение линейного износа внешнего образца (втулки) пары трения проводили методом определения весового износа образцов на основе данных измерения массы до и после испытаний. Взвешивание образцов производили на аналитических весах ВЛР-200, 2 класс, ГОСТ 19491–74 с точностью измерения до 0,0001 г.

Результаты исследования взаимодействия пар трения в процессе приработки. Для подбора оптимальных режимов при исследовании триботехнических характеристик пар трения были определены зависимости коэффициента трения от скорости скольжения. Зависимость коэффициента трения  $f$  от скорости скольжения  $V$ , при фиксированных величинах нагружения графически представлена на рис. 1.

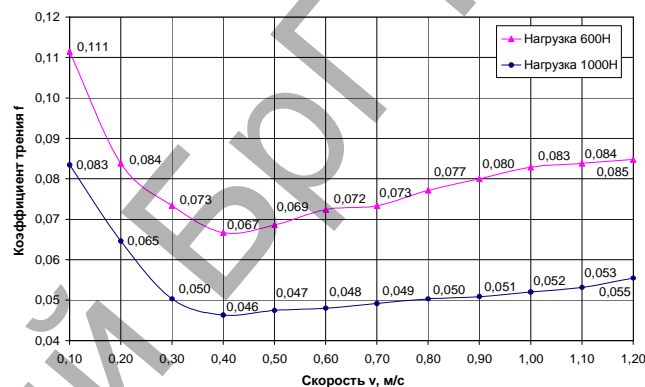


Рис. 1. Зависимость значений коэффициента трения от скорости скольжения, при заданных значениях нагружения 600Н и 1000Н

При рассмотрении полученных зависимостей следует подчеркнуть влияние типа смазочного материала, образующего граничный слой трения, на коэффициент трения в области низких значений скорости скольжения. Учитывая то, что экспериментальные исследования проводили в присутствии смазочной среды (минеральное масло И-40А), наблюдается характерное уменьшение коэффициента трения при увеличении скорости скольжения. Данное уменьшение коэффициента трения можно объяснить сокращением времени существования фрикционных связей, а следовательно, уменьшением площади, числа и пятен контакта. Немаловажное значение в данном случае имеет уменьшение вероятности разрушения граничного слоя.

Как видно на диаграмме (рис. 1), при низких скоростях скольжения, до  $V=0,3...0,4$  м/с, время контакта микронеровностей оказывается достаточным для разрушения граничного слоя под действием нагрузки, так как он слабо связан с взаимодействующими поверхностями пары трения.

Стабилизация значений коэффициента трения при более высокой скорости скольжения, в диапазоне  $V=0,4...0,8$  м/с, проявляется в результате того, что наряду с вышеописанными факторами, влияющими на понижение значений коэффициента трения, так же имеет место фактор, увеличивающий его. Данное увеличение проявляется за счет уменьшения времени контактирования неровностей взаимодействующих поверхностей между двумя соседними циклами. В результате, разрушенный на некоторых участках граничный смазочный слой может не успеть восстановиться, что увеличивает вероятность локального схватывания оксидных пленок или материалов сопрягаемых тел.

Для каждого значения прикладываемой к паре трения нагрузки, существует область значений, в которой коэффициент трения имеет минимальные значения, несмотря на увеличение скорости скольжения. Так, вне зависимости от приложенной нагрузки, минимальные показатели коэффициента трения можно наблюдать при значениях скорости скольжения в диапазоне  $V = 0,4...0,5$  м/с.

При дальнейшем увеличении скорости скольжения до значений  $V=0,8...1,2$  м/с, на увеличение коэффициента трения начинает оказы-

вать влияние также температура в зоне трения. Посредством увеличения температуры происходит смещение, а на отдельных участках и разрушение граничных слоев, что в свою очередь может привести к локальному схватыванию поверхностей взаимодействующих тел.

Следует также отметить более низкие значения коэффициента трения при более высоком показателе нагружения пары трения. Вместе с тем, очевидно, что увеличение скорости скольжения при более высоком значении нагрузки не приводит к изменению характера зависимости  $f(v)$ .

При проведении исследований пар трения, в процессе приработки имеющих отличную исходную шероховатость, полученную разными методами механической обработки, были получены следующие результаты. На рис. 2 представлены кривые изменения значений среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$  в процессе приработки пары трения. Из зависимостей видно, что при полученной после обработки чистовым точением характеристике качества поверхности  $R_a=1,31$ , в завершении приработки наблюдалось уменьшение среднего арифметического отклонения профиля ( $R_a=0,53$ ). Вместе с тем, при испытании образцов после шлифования и соответственно имеющих более низкую исходную шероховатость ( $R_a=0,27$ ), параметр шероховатости при завершении приработки имел значения, превышающие исходные ( $R_a=0,32$ ). Таким образом, в процессе приработки была получена оптимальная шероховатость для данных условий трения, которая должна обеспечить наиболее приемлемый износ пары трения. Следует отметить, что значение параметра оптимальной шероховатости было как больше, так и меньше исходного, что свидетельствует о влиянии способа обработки поверхностей на износные характеристики исследуемой пары трения.



Рис. 2. Изменения параметра среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$  поверхности детали втулка в процессе приработки

Динамика изменения величин коэффициента трения от времени испытания представлены на рис. 3.

Как видно из приведенных зависимостей, через 25–30 минут после начала испытаний наблюдались стабильные значения коэффициента трения, что говорит о переходе исследуемой пары трения в равновесное динамическое состояние.

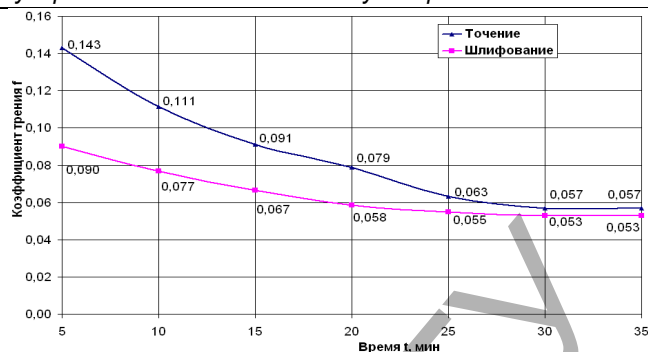


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от времени испытания пар трения в процессе приработки

Следует отметить, что процесс приработки поверхностей пар трения, обработанных шлифованием проходит быстрее. Отметим также полученные более низкие значения коэффициента трения и температуры среды для данной пары трения. Очевидно, что время приработки, сопровождаемое интенсивным изнашиванием сопряженных поверхностей, будет зависеть от того, насколько исходные параметры шероховатости будут близки к эксплуатационным, что обуславливает технологическое обеспечение оптимальных параметров качества взаимодействующих поверхностей пар трения на стадии изготовления.

Исследования величины износа поверхностей пар трения были проведены в заключительной части эксперимента.

Путь трения был определен по формуле

$$L = \frac{V}{\Delta t}, \quad (2)$$

где  $V$  – скорость скольжения, м/с;  $\Delta t$  – время испытания на износ.

Линейная интенсивность изнашивания была определена по изменению массы  $\Delta m$  изношенного слоя:

$$I_h = \frac{\Delta m}{\rho \cdot A_a \cdot L}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность истираемого материала;  $A_a$  – площадь поверхности трения истираемого материала, м<sup>2</sup>.

Плотность материалов деталей пары трения: для бронзы БрОЦС 5-5-5,  $\rho = 8840$  кг/м<sup>3</sup>; для стали 40Х,  $\rho = 7820$  кг/м<sup>3</sup>. Площадь поверхности трения составляла  $A_a = 0,0022$  м<sup>2</sup>.

Результаты испытаний пар трения на износ и расчета интенсивности изнашивания приведены в таблице 1.

Диаграмма, показывающая изменение интенсивности изнашивания пары трения от пути трения (рис. 4), свидетельствует о том, что интенсивность изнашивания пары трения в первые минуты приработки (путь трения от 0 до 0,9 км) во много раз превышает последующее изнашивание. Вместе с тем, при значении пути трения  $L = 10,8$  км наблюдается стабилизация величины интенсивности изнашивания как для поверхностей, полученных как точением, так и шлифованием. Интенсивность изнашивания пар трения в процессе приработки имеет значительно более высокие показатели, чем в процессе их стабильной работы. При этом, на данных диаграммах видно, что интенсивность изнашивания пары трения, поверхности которой по-

Таблица 1. Результаты расчета значений интенсивности изнашивания при испытаниях на износ пары трения "вал-штулка"

Время испытания $t$ , мин.	Путь трения $L$ , м	Величина суммарного износа, для поверхностей после точения $\Sigma \Delta m$ , г	Величина суммарного износа, для поверхностей после шлифования $\Sigma \Delta m$ , г	Интенсивность изнашивания после точения, $I_h$	Интенсивность изнашивания после шлифования $I_h$
15	900	0,0049	0,0032	$26,504 \cdot 10^{-11}$	$28,020 \cdot 10^{-11}$
30	1800	0,0067	0,0038	$19,393 \cdot 10^{-11}$	$19,160 \cdot 10^{-11}$
180	10800	0,0069	0,0039	$3,286 \cdot 10^{-11}$	$3,288 \cdot 10^{-11}$
360	21600	0,0073	0,0041	$1,697 \cdot 10^{-11}$	$1,739 \cdot 10^{-11}$
540	32400	0,0077	0,0042	$1,203 \cdot 10^{-11}$	$1,223 \cdot 10^{-11}$
720	43200	0,0080	0,0043	$0,929 \cdot 10^{-11}$	$0,953 \cdot 10^{-11}$

лучены шлифованием ( $R_a=0,65$ ), имеет несколько меньший показатель в процессе приработки. Вместе с тем, по достижении оптимальной шероховатости поверхности, показатели интенсивности изнашивания поверхностей, полученных разными способами обработки, менее отличны друг от друга.

Интенсивность изнашивания в процессе приработки показана на гистограмме рис. 5. Следует заметить, что интенсивность изнашивания в процессе приработки пар трения, поверхности которых получены точением, имеет более высокие показатели.

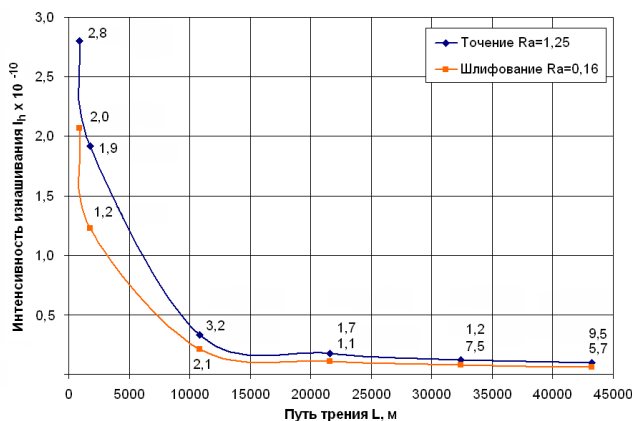


Рис. 4. Зависимость интенсивности износа от пути трения исследуемых пар трения в процессе приработки (нагрузка  $P=1000$  Н, скорости скольжения  $V=1,0$  м/с)

**Заключение.** Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют сделать следующие основные выводы:

- сформировавшееся в результате приработки оптимальная шероховатость, как и другие параметры поверхностного слоя контактирующих деталей, будет зависеть от метода механической обработки поверхности;
- длительность процесса приработки поверхностей пары трения будет зависеть от того, насколько исходная шероховатость и другие параметры качества поверхности будут близки к эксплуатационным параметрам, сложившимся после завершения приработки поверхностей;

- долговечность эксплуатации пары трения во многом будет зависеть от интенсивности изнашивания в процессе приработки и тем самым от времени самой приработки, таким образом, целесообразно уже на стадии изготовления технологически обеспечивать оптимальные параметры качества поверхностного слоя (близкую к оптимальной шероховатость).

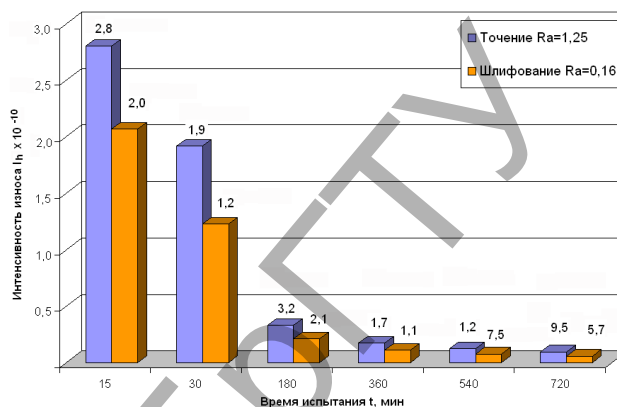


Рис. 5. Изменение интенсивности износа образцов в процессе приработки (нагрузка  $P=1000$  Н, скорости скольжения  $V=1,0$  м/с)

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Крагельский, И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
2. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов – М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
3. Хрущов, М.М. Исследование приработки подшипниковых сплавов и цапф. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1996. – 146 с.
4. Гаркунов, Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1999. – 336 с.
5. Машина для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1 / Техническое описание и инструкция по эксплуатации 2.779.013-01 ТО – М.: МЗИО, 1981. – 69 с.
6. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

Материал поступил в редакцию 30.10.15

**AKULICH Ya.A., AKULICH A.P. Research of interaction of friction pairs in the course of wear-in, in case of different methods of refinement of their surfaces**

Research of interaction of friction pairs in the course of wear-in of their surfaces is provided in article. The analysis of change of the main tribological characteristic of friction pairs is carried out: coefficient of friction, value of wear, intensity of wear in the course of wear-in. Researches of wear resistance of friction pairs in case of the given parameters of quality of a surface were conducted.

УДК 681.7

**Веремейчик А.И., Сазонов М.И., Хвусевич В.М.**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГИ И ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ**

**Введение.** Одним из основных результатов воздействия на материалы высокоинтенсивных источников энергии, одним из которых является плазменная дуга, является измерение температуры в отдельных точках объема и поверхности обрабатываемых тел. Экспериментальные исследования температур в воздушной и азотной плазменных струях выполнены в ряде работ [1–9]. Предполагая наличие термического равновесия в воздушной струе, истекающей из плазмотрона [7–10], измерения проведены спектральными мето-

дами. Экспериментальные исследования температур в воздушной и азотной плазменных струях выполнены в ряде работ [1–9]. Предполагая наличие термического равновесия в воздушной струе, истекающей из плазмотрона [7–10], измерения проведены спектральными мето-

**Веремейчик Андрей Иванович**, доцент кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета

**Сазонов Михаил Иванович**, д.т.н., профессор, профессор кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета

**Хвусевич Виталий Михайлович**, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета  
Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.